时频分析在超声导波信号分析中的应用

周正干 冯占英 高翌飞 朱 譞

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 超声导波信号是一种非平稳信号,存在频散现象,利用传统的时域和频域分析方法不能揭示其频谱随时间变化的特点. 为了解决这一问题,研究了导波信号的非平稳特征,介绍了短时傅里叶变换 (STFT, Short-Time Fourier Transform)时频分析原理,分别对铝板试样和蜂窝板试样内传播的导波信号进行了 STFT和时频谱分析,得出了铝板内导波信号中各频率成分随时间的变化情况,分析出导波信号的模式转换现象,比较精确地计算了导波的群速度;对于蜂窝板内的导波信号,由于能量泄露比较严重,当激励频率为 1.5MHz时, A0模式只能近距离传播,这就使得采用 STFT不能很好地进行模式识别. 研究结果表明,当导波传播距离较远时,利用 STFT可以对其信号进行动态的频谱分析和模式识别,并可对实际的群速度进行较精确的测量.

关 键 词: 超声波检测; 导波; 频散特性; 时频分析; 短时傅里叶变换; 铝板; 蜂窝板

中图分类号: TG 115.285

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)07-0833-05

Application of time-frequency analysis to ultrasonic-guided-wave signal interpretation

Zhou Zhenggan Feng Zhanying Gao Yifei Zhu Xuan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Ultrasonic guided wave is a kind of non-stationary signal and characterized by disperse. Its frequency spectrum variation can not be traced with traditional methods in time domain and frequency domain respectively. To solve the problem, the non-stationary characteristics of guided waves were studied, the theory of STFT (short-time Fourier transform) was introduced, the STFT and time-frequency spectrum analysis were applied to the signal interpretation of guided waves propagating in an aluminum plate and a honeycomb core structure plate. The frequencies variation of the signal propagated in aluminum plate can be analyzed as well as mode conversion and precise group velocity. Due to energy leakage, A0 mode propagates just in short distance in honeycomb core structure plate when the excitation center frequency is 1.5MHz, which results in that mode conversion can not be done well. The results show that in further distance can the STFT method be applied to not only the frequency spectrum analysis and mode identification of guided waves but also an accurate measurement of their group velocity.

Key words: ultrasonic testing; guided waves; dispersion; time-frequency analysis; STFT (short-time Frourier transform); aluminum plate; honeycomb core structure plate

超声导波检测作为一种高效的无损检测手段,在大型板壳的缺陷检测中有很好的应用前景. 但是,导波信号是一种非平稳信号,存在频散现象. 由于普通探伤仪的激励信号是脉冲信号,频谱比较宽,故由普通探伤仪激发出的导波通常至少包含有两种模式,这些模式在时域内通常会混叠

收稿日期: 2007-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50475006)

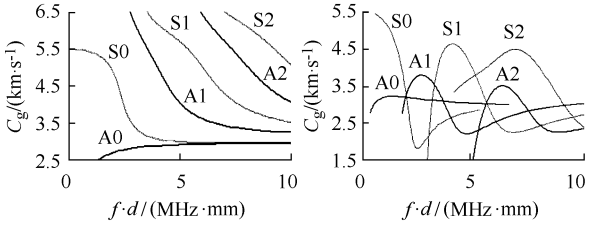
作者简介: 周正干 (1967-),男,湖南湘潭人,教授, zzhenggan@buaa.edu.cn

在一起,难于分辨;当遇到边界和缺陷时,导波信号会发生模态转换,信号频率成分发生变化.所以,导波信号的频谱是时间的函数,分析导波信号时有必要对其进行时频分析.

对导波信号进行时频分析的方法有二维FFT[1]、Wigner-ville变换[2]、Hibert-Huang变换[3]、小波变换[4-5]和短时傅里叶变换(STFT, Short-Time Fourier Transform)[6]等.二维FFT能确定各个传播模式的幅度,但它不能在时域和频域内同时分析,会出现假频现象.Wigner-ville变换可以避免假频现象的发生,能够分辨出缺陷散射波,但计算复杂.Hibert-Huang变换计算群速度的精度较低.小波变换在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力,但应用较复杂.STFT变换克服了傅里叶变换不具备局部分析的缺点,且易于实现,在一定的范围内可对导波信号进行有效的时频分析.本文针对大型薄板和蜂窝板中的导波信号,采用STFT变换方法对导波信号进行了时频分析,对导波的频谱变化做了详细的研究.

1 导波信号特征分析

导波的频散特性可以用频散曲线表示.铝板中导波的频散曲线见图1(计算条件:铝板中的纵波声速为6 370 m/s,横波声速为3 160 m/s),图中S0, S1, S2, A0, A1和A2分别表示导波的模式.



a 相速度频散曲线 b 群速度频散曲线

图1 铝板中导波的频散曲线和模式

从图1可看出,导波的各个模式在频散曲线上是一条连续的曲线.在群速度频散最小的区间,导波传播的波包比较紧凑,而当群速度频散比较明显时,导波的波包就比较宽,可以看到不同频率成份的波以不同的速度传播.另外,即使是频散最小的区间,当导波在传播过程中遇到缺陷和边缘时,散射引起的模式转换也会使波包的形状发生改变.

可见,导波在传播过程中,信号的频谱会随着时间而发生变化,在时域中难以看出其频谱成份的变化情况,只有同时在时域和频域内对导波信号进行分析,才能揭示导波信号传播过程的特点.

2 STFT变换理论

传统动态分析方法的研究对象主要限于线性时不变系统和稳态过程,故其应用还存在一定的局限性.如傅里叶变换,只能得到信号中包含那些频率分量以及各分量的相对强度信息,至于这些分量如何随时间演变就不得而知.这对平稳信号来说是足够的,但是对于频率随时间变化的信号,就无能为力了.20世纪90年代后,以时频联合域分析方法(JTFA, Joint Time-Frequency Analysis)为代表的现代系统分析方法发展很快,所关注的对象是瞬态过程和时变系统,主要有STFT、小波分析、Wigner-Ville时频分布和时频分布级数等.时频分析的最大优点是能清晰地描述一个过程在任意时刻的频率结构.

STFT的基本思想就是用窗函数来截取信号,假定窗口内信号是平稳的,对其进行傅里叶变换得到局部频域信息.对应于一定的时刻 t, STFT变换只对窗口附近内的信号作分析,可粗略地反映信号在该窗口附近的局部频谱信息.然后沿着信号移动窗函数,就可得到信号频率随时间变化的关系,从而得到信号的时频分布.其定义为[7]

$$S(t,\omega) = x\int(\tau)\gamma^{*}(\tau - t)\,e^{-j\omega\tau}\,d\tau \qquad (1)$$

式中,$x(t)$为信号;$\gamma(\tau - t)\,e^{-j\omega\tau}$为基函数;$t$为时间;$\omega$为信号的角频率.

式(1)是一个标准的内积表达式,反映了信号 $x(t)$与基函数 $\gamma(\tau - t)\,e^{-j\omega\tau}$的相似程度.函数$\gamma(\tau)$通常具有短时延拓,又被称为窗函数.

当把超声导波信号采集到计算机中后,由于信号变成了离散信号,因此应对采集到的数据进行离散STFT变换.对于离散序列信号 $x(n)$,其 n 时刻的短时段数据可定义为

$$x_n(m) = x(m)w(n - m) \qquad (2)$$

式中 $w(n)$是窗函数,可呈中心对称.

信号 $x(n)$的离散傅里叶变换可表示为

$$S(n,\omega) = \sum x(m)w(n - m)\,e^{-jm\omega} \qquad (3)$$

上述方法实际上就是用一个中心对称的滑动窗函数截取观测信号,并对不同时刻的短时段信号进行傅里叶变换,随后得到各段信号构成的频谱.其实现原理如图2所示.

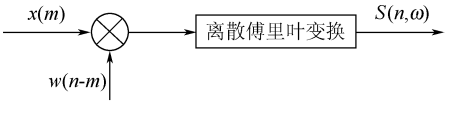


图2 STFT变换实现原理图

3　导波信号 *STFT*变换

对于导波信号,每个频厚积至少对应 2种模式存在,采用 STFT变换可观察信号中各频率分量随时间变化的情况,分析各模式遇到缺陷或边界的变化,从而确定检测某种缺陷的最佳模式.

3.1　薄铝板中导波信号的 STFT变换

铝板试样长和宽为 1 000 mm ×400 mm,厚度为 1 mm,换能器中心频率为 1.5 MHz,带宽为 1MHz,选用导波模式 S0,发射接收方式为自发自收方式.可变角斜探头放置在板端 700 mm处,调整入射角为 32°,激发 S0模式的导波,见图 3.

换能器接收到的导波信号如图 4a所示.对该信号进行 STFT变换,采样频率为 50MHz, FFT计算点数为 512点,窗函数取 Hanning窗,分段重叠点数设为 256,图 4b为该信号的 STFT时频谱.

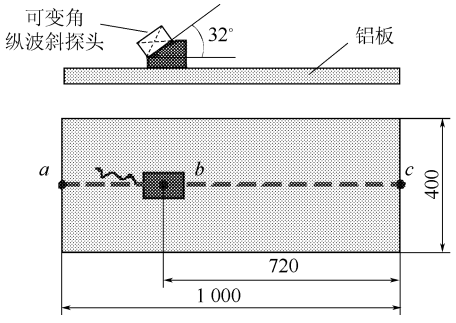
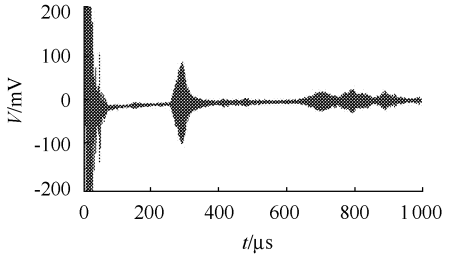
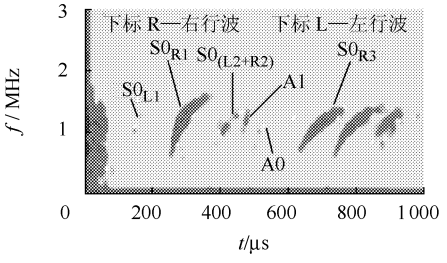


图 3　铝板试样检测示意图 (单位:mm)



a　导波信号



b　导波信号的 STFT时频谱

图 4　薄铝板中的导波信号及其 STFT时频谱

3.2　蜂窝板中导波信号的 STFT变换

蜂窝板试样长和宽均为 245 mm,其蒙皮厚度为 0.5 mm,换能器中心频率为 1.5 MHz,带宽为 1MHz,选择导波模式 A0,发射接收方式为一发一收方式.发射探头和接收探头相距 20 mm,可变角入射角为 75°.图 5为蜂窝板试样检测示意图.

蜂窝板脱粘时,接收换能器接收到的导波信号见图 6a.对其进行 STFT变换,采样频率为 50MHz, FFT计算点数为 256点,窗函数取 Hanning窗,分段重叠点数设为 128.图 6b为蜂窝板脱粘时接收换能器接收到导波信号的 STFT时频谱.

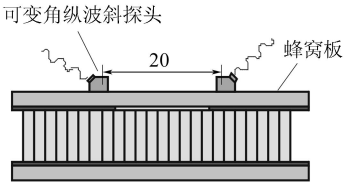
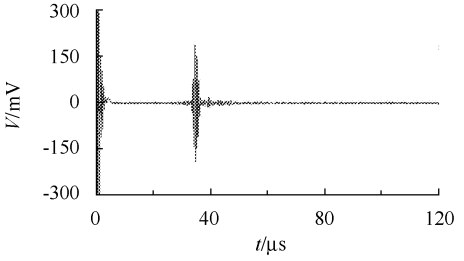
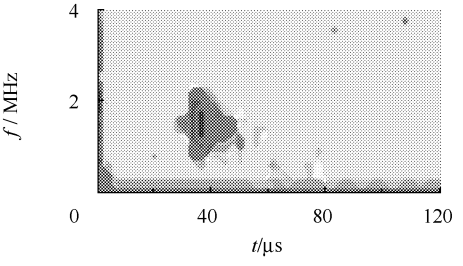


图 5　蜂窝板试样检测示意图 (单位:mm)



a　导波信号



b　导波信号的 STFT时频谱

图 6　蜂窝板中的导波信号及其 STFT时频谱

4　导波信号 STFT变换谱分析

4.1　铝板内的导波信号 STFT变换谱分析

4.1.1　频散估计

试验使用的换能器频率范围为 0.5～2MHz,根据图 1b中的频散曲线,从理论上得知在该频率范围内有 S0,A0和 A1三种模式存在, S0模式的传播速度随频率的增加而减少,频散现象明显; A0模式的传播速度在低频范围内单调增加,然后形成高点后单调下降,频散现象相对较弱; A1模式则在截止频率 1.5～2MHz内单调减少,频散现象较为明显.

从图 4b可以看出,除去信号的始波以外,导波信号的频率范围在 0.7～1.8MHz之间,共有

S0,A0,A1三种模式.其中 S0模式传播速度随着频率升高而降低;A0模式和 A1模式速度变化不是很明显,这主要是由于换能器激励入射角为 32°信号主要成分为 S0模式,其它模式信号的信号很弱造成的.实际观测到的频散现象与理论频散基本一致.

4.1.2 模式识别和模式转换

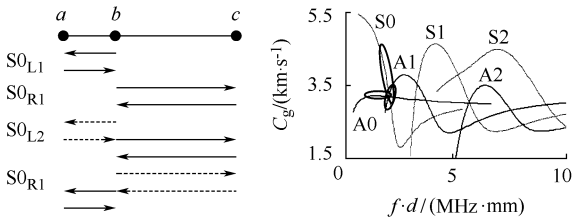
从图 4a可以看出,从板端返回的第 1个波包峰值比较大,传播时间为 294μs,紧接在它后边还有 2个较小的波包,在时域内几乎分辨不清,这是从左右板端返回的第 1个波包群;再后边的是连续 3个比较大的波包,包含的主要成分是第 1个波包群经过换能器后,继续向前传播,到达左右板端时反射返回,被换能器再次接收,形成第 2个波包群,这一组波包中第 1个波包相对于第 1组波包传播时间为 432μs

在时域图中,由于多个频率信号混叠在一起,鉴别信号中的模式比较困难,且不够准确,尤其是时域信号比较弱的情况下,更加难于分析.如果从信号的 STFT时频谱进行分析,则相对直观容易,参照图 4b.

首先分析第 1个波包群.从时频谱可以看到,在时域图中分辨不清的波包群在时频域已明显分离开来,除了在时域中看到的几个波包外,还多了几个小波包.第 1个小波包 $S0_{L1}$的频率成分主要是 1.3MHz,且其频率范围在 1.1～1.5MHz之间,该波包是 S0模式左行波首次返回探头的波.第 2个大波包 $S0_{R1}$的频率成分主要是 1.5MHz,且其频率范围在 1.0～2.0MHz之间,该波包是 S0模式右行波首次返回探头的波.此外,在时域内看不清楚的第 3个波包($S0_{L2}+S0_{R2}$)和第 4个小波包(A1)此时清晰可见,而且还出现第 5个小波包(A0),其频率成分均在 1.4～1.8MHz左右.从它们的传播速度可判断出,第 3个波包($S0_{L2}+S0_{R2}$)是 S0左行波第 2次返回的波和 S0右行波 2次返回波的叠加,第 4个波包 A1和第 5个波包 A0是 A1和 A0模式右行首次返回的波. S0模式各波包传播途径如图 7a所示.

接下来分析第 2个波包群.前面已经提到,当导波遇到缺陷或边缘时,会发生模式转换.从第 2个波包群可以明显地看到这种模式转换现象.相对于第 1个波包群,第 2个波包群的各模式所占的比例有所变化.虽然波包的主要成分仍然是 S0模式,但是,由于在板端边缘发生模式转换,A0和 A1模式的部分能量转换为 S0模式,S0模式能量得以加强,如图 4b中的 $S0_{R3}$所示.在 $S0_{R3}$后边的多个波包是前边提到的多个模式左右行波几次反射后的叠加,经过多次反射,第 2个波包群里众多模式的多次反射回波已混叠在一起,单一模式的波包基本不再存在.

由此可见,当导波传播距离比较远时,利用 STFT时频谱,可比较清楚地分析出导波在传播过程中的模式成分以及模式转换情况.



a S0模式各波包传播途径　　b 局部频散曲线

图 7 铝板试样中换能器接收到导波的时频谱分析图

4.1.3 群速度计算

从图 1b查出铝板中导波群速度的理论值.分别取频率为 1.3MHz,1.5MHz和 1.8MHz的各模式的群速度,见表 1.

表 1 铝板中导波群速度

f/MHz	模式	导波群速度/(m·s^{-1})			
		理论值	时域测量值	频域测量值	频域误差/%
1.3	S0	4925		4912	2.6
	A0	2516		2666	6.0
1.5	S0	4625	4761	4697	1.6
	A0	2583			
1.8	S0	3916		3954	4.0
	A0	2683			
	A1	2766		2800	1.2

为了比较时域和时频域在计算群速度方面的差别,分别对 2种情况的群速度进行计算.时域内第 1个波包群内只能分辨出 S0模式,计算 S0模式的群速度. $S0_{R1}$波包的传播时间是 294μs,传播路程为铝板 b点到 c点距离的 2倍:1400mm,计算群速度如下:

$$C_g = 1400 \times 1000/294 = 4761\ (\mathrm{m/s})$$

按照这种方法,分别在时域和时频域中计算各模式的群速度,见表 1.明显可以看出,在时频域可得出较多模式不同频率的群速度,且误差在 6%以下,比时域内的计算精确且提取的信息比较多.根据这些群速度值,也可绘制出铝板的局部频散曲线,见图 7b中黑色椭圆所示区域.

4.2 蜂窝板蒙皮内导波信号 STFT变换谱分析

当频厚积比较低时,蜂窝板内存在的导波模式与单层铝板内的导波模式接近[8].本文检测蜂窝板试样的频厚积为 0.75MHz,用单铝板的频散

曲线对其进行分析.

由于蜂窝板蒙皮下面有胶层和蜂窝芯,因此当导波在蜂窝板蒙皮内传播时,相当多的能量会泄露进胶层和蜂窝芯,从而导致信号减弱,不能传播较远的距离.这种近距离的传播使得各模式不能分离开来,时域内本来就无法分辨,在时频域也表现为各模式混叠在一起,如图 6所示.因此不能像铝板那样对其中的导波模式进行准确的识别.但是,采用 STFT时频谱可以对其能量进行评价,比较粘接良好和脱粘时的情况,可以对蜂窝板的粘接情况进行检测.限于篇幅,这里不再赘述.

5 结 束 语

对铝板内中心频率为 1.5MHz的导波信号进行 STFT时频分析,可以看出导波信号中各频率成分 (1.0～2.0MHz之间)随时间的变化情况,分析出导波信号的模式转换现象,如 S0, A0和 A1模式等,还可以比较精确地计算导波的群速度.与传统的动态分析方法相比,这种方法可以实时分析出导波这种动态非平稳信号的频谱变化情况,有利于增强对导波信号的理论分析,提高实际检测时利用群速度进行缺陷判别的精度,从而增强导波检测的实用性.

对于蜂窝板内传播的导波信号,由于能量泄露比较严重,当激励频率为 1.5MHz时, A0模式只能近距离传播,这就使得采用 STFT变换不能很好地进行模式识别.但是采用时频谱可对其进行能量评价,从而判断蜂窝板的粘接情况.

参考文献 (References)

[1] 刘振清,他得安.用二维傅里叶变换识别兰姆波模式的研究[J].声学技术, 2000, 19(4): 212 - 219
Liu Zhenqing, Ta De'an, Mode identify of Lamb by means of 2-D FFT[J]. Technical Acoustics, 2000, 19(4): 212 - 219 (in Chinese)

[2] 他得安,刘振清.超声无损检测中的二维快速 Fourier变换及 Wigner-Ville变换[J].无损检测, 2001, 23: 313 - 316
Ta De'an, Liu Zhenqing, Two-dimensional fast Fourier transform and Wigner-Ville transform in nondestructive testing[J]. Nondestructive Testing, 2001, 23: 313 - 316 (in Chinese)

[3] Apostoloudia A, Douka E, Hadjileontiadis L J, et al. Time-frequency analysis of transient dispersive waves: A comparative study[J]. Applied Acoustic, 2006: 1 - 14

[4] Jeong Hyunjo, Jang Young-Su. Wavelet analysis of plate propagation in composite laminates[J]. Composite Structures, 2000, 49: 443 - 450

[5] 陈益,李书.改进的小波阈值消噪法应用于超声信号处理[J].北京航空航天大学学报, 2006, 32(4): 466 - 470
Chen Yi, Li Shu. Application of improved threshold denoising based on wavelet transform to ultrasonic signal processing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(4): 466 - 470 (in Chinese)

[6] Shin Hyeon Jae, Song Sung-Jin. Time-localized frequency analysis of ultrasonic guided waves for nondestructive testing[C]// AIP Conference Proceedings, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. New York: American Institute of Physics, 2000, 509(1): 709 - 716

[7] 温熙林.机械系统动态分析理论与应用[M].长沙:国防科技大学出版社, 1998: 240 - 241
Wen Xilin. The theory and application of mechanical system dynamic analysis[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1998: 240 - 241 (in Chinese)

[8] Seifried Robert, Jacobs Laurence J, Qu Jianmin. Propagation of guided waves in adhesive bonded components[J]. NDT and E International, 2002, 35(5): 317 - 328

(责任编辑:文丽芳)